

# **UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA**

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky

Studijní program: Geotechnologie

Studijní obor: Geologie



## **Způsoby měření pomalých pohybů na diskontinuitách**

### **Methods for measurements of slow motions on discontinuities**

#### **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Sára Mahlerová

Vedoucí: RNDr. Josef Stemberk, CSc.

Konzultant: prof. RNDr. Tomáš Fischer, Ph.D.

Praha, 2017

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 21.8.2017

Podpis:

## Poděkování:

Mockrát děkuji svému školiteli RNDr. Josefovi Stemberkovi, CSc. za vedení práce. Za cenné poznámky a rady děkuji svému konzultantovi prof. RNDr. Tomášovi Fischerovi, Ph.D. Za podporu při psaní svému chlapci Jakubovi Roháčovi. A mámě.

V Praze, 21. 8. 2017

Sára Mahlerová

## Abstrakt

Vzhledem k zvyšující se hustotě zalidnění na Zemi jsou stále častější případy katastrof způsobených pohyby zemských mas. Proto je třeba velmi pečlivě sledovat pomalé pohyby, které sice zdánlivě nikoho neohrožují, mohou ale vyústit v pohyby rychlejší a tím i mnohem nebezpečnější. V úvodní části této bakalářské práce jsou popsány relevantní svahové deformace. Jedna část se věnuje procesům, které pohyby geologických celků způsobují a podmínkám, za kterých k deformacím dochází. Dále se práce zabývá samotnými metodami, které tyto velmi pomalé deformace dokáží měřit. Lze je rozdělit do tří skupin – geotechnických metod, pozemních geodetických metod, metod dálkového průzkumu Země a fotogrametrii. Každá z metod se vyznačuje jinými možnostmi aplikace pro různé podmínky měření a různý typ lokality, a jinou přesností naměřených dat. Práce shrnuje všechny důležité vlastnosti jednotlivých metod a nabízí tak přehled všech relevantních metod měření pomalých pohybů na diskontinuitách.

## Abstract

Due to the increasing density of population on Earth, disasters caused by Earth's mass movements are occurring more and more frequently. Therefore it is necessary to very carefully monitor slow movements that do not seem to endanger anyone, but can result in faster and even more dangerous movements. In the introductory part of this bachelor thesis relevant slope deformations are described. One part deals with the processes that the movements of the geological units cause and the conditions under which the deformations occur. Further, the thesis deals with the methods themselves, which can measure these very slow deformations. These can be divided into three groups - geotechnical methods, ground geodetic methods, Earth exploration techniques and photogrammetry. Each of these methods is characterized by different options of application for different conditions of measurement and different types of sites, and different accuracy of measured data. The thesis summarizes all important characteristics of each method and offers a review of all relevant measurement methods of slow movements on discontinuities.

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Pomalé pohyby .....	1
2.1	Pohyby exogenního původu .....	1
2.2	Pohyby endogenního původu .....	3
2.3	Pohyby antropogenního původu .....	3
3	Metody monitoringu .....	5
3.1	Geotechnické metody .....	5
3.1.1	Lankový extenzometr .....	5
3.1.2	Vrtný extenzometr .....	6
3.1.3	Pásmový extenzometr .....	7
3.1.4	Deformometr .....	8
3.1.5	Tyčový extenzometr .....	8
3.1.6	Inklinoměr .....	9
3.1.7	LVDT .....	10
3.1.8	TM – 71 – Terčové měřidlo .....	11
3.1.9	Laserový dálkoměr .....	13
3.2	Dálkový průzkum Země a družicové metody .....	13
3.2.1	GNSS .....	13
3.2.2	Radarová interferometrie – InSAR .....	14
3.2.3	EDM – Elektronický dálkoměr .....	15
3.2.4	LiDAR .....	15
3.3	Pozemní geodetické metody .....	18
3.3.1	Nivelace .....	18
3.3.2	Přesná nivelace .....	18
3.3.3	Triangulace .....	18
3.3.4	Polygonový pořad .....	19
3.3.5	Záměrná přímka .....	20
3.4	Fotogrammetrie .....	20
3.4.1	Letecká fotogrammetrie .....	20
3.4.2	Pozemní fotogrammetrie .....	21
4	Shrnutí metod .....	22
5	Závěr a diskuse .....	23
6	Použitá literatura .....	24

# 1 Úvod

Měření pohybů na diskontinuitách geologických celků je důležitá úloha jak pro obecnou, tak pro aplikovanou geologii. Diskontinuity ovlivňují mechanické vlastnosti celých masívů a studium jejich pohybů je proto zásadní nejen z vědeckého hlediska, ale i v zájmu ochrany lidských životů a děl.

Pro začátek je třeba definovat, co vůbec takový pomalý pohyb znamená. Jedná se o okem nepozorovatelné posuny, které buď kontinuálně, nebo skokově postupují v řádech desítek nebo i stovek let. Jde o jevy nenápadné, o to překvapivější jsou potom ale jejich velikosti. Pomalé pohyby tedy sice nezahrnují svahové sesuvy nebo řícení v konečné formě, právě ty ale začínají velmi mírnými pohyby, u kterých za příznivých podmínek může dojít k akceleraci.

Příčiny pohybu a místa výskytu pomalých pohybů jsou velmi různorodé. Tím je také způsobeno, že se s úskalími efektivního měření potýká široké spektrum oborů. Zatímco posuny na tektonických zlomech jsou produktem endogenních procesů, svahové pohyby, ať už mělké nebo hluboce založené, vděčí za svůj vznik spíše exogenním vlivům a gravitaci. Zdánlivě jinou disciplínou by se mohlo zdát měření pohybů spojených s lidskými výtvy, tedy na stavbách nebo v tunelech. Ve skutečnosti ale mohou stejné metody měření vyhovovat takto odlišným prostředím.

Mým hlavním úkolem v rámci této bakalářské práce je tedy vypracovat seznam všech relevantních (stále aktivně využívaných) metod měření pomalých pohybů. Zhodnotit jejich technické parametry, zvážit, pro jaká prostředí je vhodné tu danou metodu použít, což závisí jak na přesnosti dat, kterou nám je metoda schopná nabídnout, tak na výstupních datech, která jsou pro daná měření žádoucí.

## 2 Pomalé pohyby

Jak už bylo zmíněno v úvodu, pomalé pohyby mohou mít exogenní, endogenní nebo antropogenní původ.

### 2.1 Pohyby exogenního původu

Exogenně způsobené deformace jsou primárně svahové pohyby. Termínem svahové pohyby označujeme transport horninových hmot účinkem zemské tíže. Případy, kdy je transportním médiem voda, sníh nebo led, se v inženýrské geologii nepovažují za svahové pohyby (Záruba, 1987).

Svahové pohyby jsou přírodním fenoménem rozšířeným po celém světě, na souši i pod hladinou moře. Často způsobují škody, ohrožují majetek a lidské životy. Jsou průvodním jevem zemětřesení, nadměrných dešťových srážek ale i lidské činnosti. V České republice je svahovými deformacemi

zasažena asi 1 % území. Pro vznik pohybu musí podle Ondrášika (1991) lokalita splňovat vhodné geologické, geomorfologické, hydrogeologické a klimatické podmínky. Za působení faktorů jako např. zvětrávání, objemové změny vody v prostředí vlivem mrazu nebo změny napětostních podmínek potom začne docházet k deformaci. Mezi velmi pomalé pohyby, které dosahují rychlostí milimetrů/centimetrů za rok a které jsou předmětem zájmu této práce, se řadí pouze plouživé pohyby. Ty se dále dělí na tři typy:

- Hlubinné plouživé pohyby svahů

Hlubinně založené pohyby vznikají zejména na horských svazích, kde buď uvolněním napětí, nebo tektonickými pohyby dojde ke vzniku puklin. Pohyb probíhá buď po tektonických zlomech, nebo po měkkých (např. jílovitých) vrstvách. Rozvolněné podloží může být zcela překryto, což vede k obtížné identifikaci rizikových oblastí. Pohyb vzniká na rozdíl od soliflukce nebo pohybu sutí na předurčené vrstevní ploše. Vzhledem k tomu, že se jedná o jev často se vyskytující v horských oblastech, je záhodno myslet při výběru vhodné pozorovací metody tu, která počítá s možností ztíženého přístupu zvláště v zimních obdobích.

- Gravitační vrásnění

Vrásnění způsobené gravitací vzniká několik geologických období a při jeho tvorbě nelze identifikovat jasná smyková plocha. Ta se objevuje až po delší době, kdy je svah v pokročilém stadiu deformace (Moreno et al., 2016). Nejčastěji lze na gravitační vrásnění narazit na okrajích sedimentačních pánví, kde jsou už v počátečním stadiu pánevní vrstvy mírně prohnuté. Vrstvy se pomalu shrnují ze svahu dolu, čímž vznikají šikmé vrásy (Pargač, 2013).

- Blokované sesuvy

Na tento druh nenápadného pohybu lze narazit v místech střetu rozpukaných hornin na měkkém jílovitém podloží. Bloky na okrajích se zabořují do vrstvy pod sebou. Ta se vytlačuje a nese s sebou bloky dolu po svahu. Bloky jsou namáhány tahovým napětím, čímž dochází k jejich dalšímu rozpukávání podporovanému ještě povětrnostními vlivy.



## 2.2 Pohyby endogenního původu

Působením endogenních sil vznikají tektonické struktury. Síly jsou vyvolány pohyby v plášti z důvodu lokálních gravitačních instabilit (tavení hornin). Nastává zde pomalé proudění hmot astenosféry a pohyby se přenášejí směrem k povrchu do rigidní litosféry. V rigidních blocích litosféry nastává deformace hornin. Podle Kachlíka a Chlupáče (2005) vznikají deformací dva typy tektonických struktur:

- Vrásové struktury – vznikají v plastičtějších horninách
- Zlomové struktury – vznikají v přípovrchových částech litosféry

Vrásy představují objemové deformace hornin, při kterých dochází ke změně tvaru nebo i objemu, celistvost původního tělesa zůstává však zachována. Na rozdíl od vrásových struktur, celistvost se nezachovává u zlomových struktur. Vznikají zde diskontinuity od mikrotrhlin, přes pukliny a drobné zlomy až po zlomy planetárních rozměrů. Za zlom považujeme takovou poruchu, na níž došlo ke geologicky významnému pohybu. Poruchu, na níž došlo k pohybu geologicky málo významnému, nazýváme puklina. Vznik puklin ale často předchází vzniku zlomů.

Zlomy se v terénu projevují různým způsobem. Na výchozech nebo v důlních dílech se projevují rozpukáním nebo drcením hornin. Morfologicky se v terénu poznají výskytem depresí, posunem hřbetů odolných hornin nebo existencí zlomových svahů. Zlomové struktury vznikají v mělkých částech zemské kůry, kde se horniny chovají převážně křehce. Z hlediska pohybů ker a orientace zlomových spár (trhlin) v napěťovém poli se zlomy dělí do 3 skupin:

- Tahové zlomy – pohyb kolmo ke zlomové spáře
- Tlakové zlomy – bez pohybu, často sprovázené drcením ker
- Střížné zlomy – pohyb podél zlomové spáry

Pohyby na zlomech významně ovlivňují a komplikují inženýrskogeologické poměry a představují nebezpečí pro objekty, kde je horninový masiv hlavním nosným prvkem stavby (tunely, hráze, mostní opěry). Proto je měření pohybů na zlomech důležitým aspektem ať už při samotné stavbě, nebo při následném monitoringu už zrealizované stavby.

## 2.3 Pohyby antropogenního původu

Mezi tyto typy pomalých pohybů se řadí deformace způsobené lidskou činností. Rozhodujícím faktorem, který odstartuje deformaci, je zásah člověka do geologické struktury. Jako příklad takového zásahu, u kterého je potřeba monitorovat případné pohyby, uvádí Rozsypal (2001) povrchovou nebo podzemní těžbu, která silně naruší přirozené prostředí. Podobně jako je tomu u povrchové těžby může být stabilita svahů narušena také zásahem v podobě liniové stavby. Různé změny geologických poměrů

způsobené člověkem působí destruktivně i na konstrukce nacházející se v blízkosti deformace. Proto se monitorují například změny poklesových depresí nad tunely a vliv na budovy v jejich okolí.

### 3 Metody monitoringu

Přestože jsou pomalé pohyby tak nenápadné, mohou způsobit velké škody. V zastavěných územích mohou i při svých nízkých rychlostech ničit lidská díla a v případě zvýšení rychlosti způsobit i ztráty na životech. Proto je velmi důležité mít o deformacích přehled a zvolit vhodnou metodu ke kontrole vývoje rychlosti posunů.

Při výběru vhodné metody je záhodno se zamyslet nad několika kritérii. V první řadě je třeba vědět, kvůli čemu oblast vůbec monitorovat chceme, jaká data očekáváme a co z nich potřebujeme zjistit. Podle typu mechanismu deformace se potom vybírá vhodný přístroj. Ten musí mít pro potřeby daného problému dostatečně vysokou citlivost, čímž je myšlena nejmenší změna hodnoty, kterou je zařízení schopno zaregistrovat. Spolu s citlivostí je spojen také interval, ve kterém je měření prováděno a zda je nutné sbírat data ručně nebo budou odesílána automaticky ke zpracování. Nároky na přístroj se liší také v tom, jestli je třeba snímat deformace diskontinuity pouze v jednom směru nebo je potřebujeme znát ve všech třech směrech zároveň. Praktickou se také může ukázat možnost kontroly správné funkce přístroje během měření, pokud je zařízení instalováno ve špatně dostupném terénu a hrozí jeho poškození, může přijít celé měření vniveč. Podobný aspekt je potom trvanlivost přístroje, a tedy jeho odolnost proti změnám teplot, vlhkosti nebo chemismu vody. Po předchozím studiu lokality je nutné zvážit procesy, které by mohly mít vliv na stabilitu přístroje, a tak i na kvalitu měření. Takovými vlivy můžou být například otřesy způsobené přirozeným nebo indukovaným zemětřesením.

Metody používané v současnosti můžeme rozdělit do čtyř hlavních skupin:

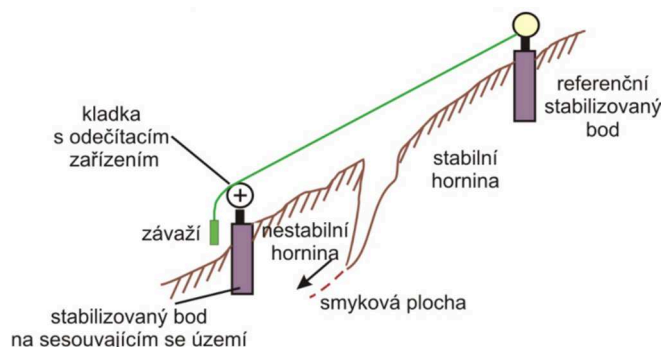
- Geotechnické metody
- Pozemní geodetické metody
- Fotogrammetrie
- Dálkový průzkum Země a družicové metody

#### 3.1 Geotechnické metody

##### 3.1.1 Lankový extenzometr

Měření lankovým extenzometrem je jednoduchá metoda, při které je jeden nebo více „volných“ bodů spojeno s „pevným“ bodem a jsou zaznamenávány změny vzdálenosti tohoto spojení v čase. Při aplikaci extenzometru pro potřeby monitoringu pohybů svahu nebo skalních bloků se spojují dva body v prostředí nestabilního území. Měříme tedy rozdíl posunu v jednom směru. Pokud si měření žádá absolutní změny vzdálenosti bodů, je nutné extenzometr ukotvit mimo deformační zónu, což může být v případě její velké rozlohy problém (Malet et al., 2002). Ilustrace takového extenzometru s jedním

stabilním koncem je na obrázku 1. Pokud chceme zjistit vektor deformace v rovině, musí se na studované lokalitě umístit minimálně tři extenzometry do tří různých směrů. Senzory zaznamenávající změny délky nataženého lanka jsou zpravidla mechanické, jako například úchylkoměry. Poslední vývoj v technologii extenzometrů poskytuje plně automatizované čtení prodloužení (Savvaidis, 2003).



*Obr.1: Princip lankového extenzometru pro měření na povrchu území (upraveno podle Rozsypal, 2001, zdroj: [www.geologie.vsb.cz](http://www.geologie.vsb.cz))*

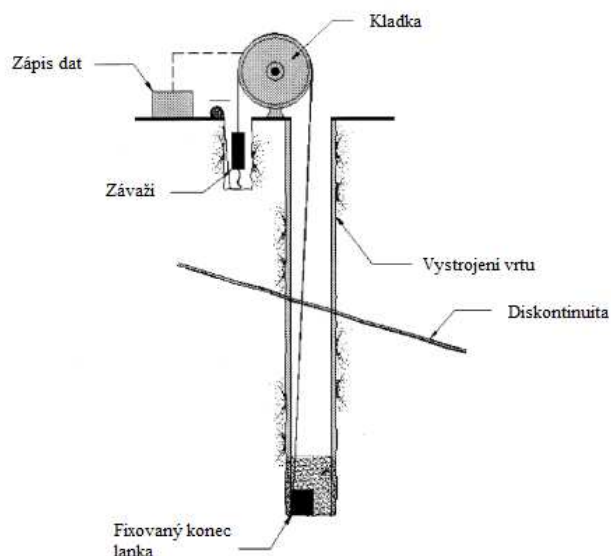
Přesnost měření extenzometrem velmi závisí na schopnostech obsluhujícího pracovníka – na začátku měření musí být dosaženo ideálního napnutí pásky, a to musí být udrženo po celou dobu měření. Při zpracování naměřených dat je také nutné zohlednit teplotní výkyvy, ke kterým během monitoringu docházelo. Pro snížení vlivu teploty na měření se používají na lanka materiály nenáchylné k roztahení jako je ocel, invar, aluminium nebo sklolaminát, podle prostředí, ve kterém bude zařízení umístěno. Lanko také musí být odolné proti korozi. Jak uvádí Guerriero (2017) zajišťuje současná technologie při ošetření všech těchto rizikových faktorů přesnost měření kolem 0,1 mm.

### 3.1.2 Vrtný extenzometr

Vertikální změny způsobené například silnými dešti a evapotranspirací v oblasti sesuvu se pohybují v malých měřítkách, která jsou ostatními metodami těžko zachytitelná. V oblastech náchylných k sesuvům je ale i tento typ monitoringu důležitý. Proto byl k tomu vyvinut speciální přístroj – vrtný extenzometr.

Jak je názorně vyobrazeno na obrázek 2, je jeden konec lanka vyrobeného většinou ze slitiny odolné proti tepelnému roztahování upevněn na dně vrtu, druhý konec je veden k povrchu. Tam je na kovovém rámu umístěna kladka, přes kterou visí volný konec lanka. Ideální napnutí kontroluje závaží na volném konci. Vertikální změny prostředí způsobí změnu polohy volného závaží, které kontinuálně snímá elektromagnetický měřič odolný vůči vlhkosti (Mentes, 2011).

Coronimas (2000) uvádí jako rozsah měření této metody 4,5 mm, záznam probíhá obvykle jednou za hodinu a chyba měření se pohybuje kolem 0,03 mm.

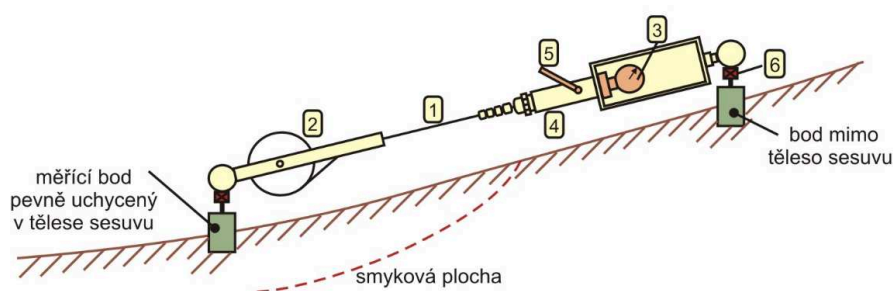


Obr. 2, upraveno, převzato z Coronimas J. et al (2000)

### 3.1.3 Pásmový extenzometr

V případě pásmového extenzometru se lanko nahradí pásmem vyrobeném z invaru. Zařízení je vybavené pružinou, která zajišťuje konstantní napjatost pásma. Kvůli korekcím na teplotu je důležité pásmo kalibrovat na rámu, který je dodáván spolu s přístrojem (Štainerová, 2015).

Oba konce zařízení se připevní k fixovaným (zacementovaným) měřičským bodům na obou stranách očekávané nebo existující diskontinuity.



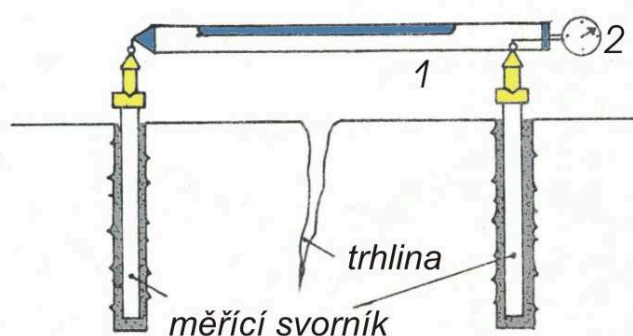
Obr.3: Princip pásmového extenzometru. 1 -páska z invarové oceli, 2-naviják pásky, 3-úchylkoměr, 4-pružina napínající pásmo, 5-páska napínající pásmo před měřením, 6-měřičské body (upraveno podle Rozsypal, 2001, zdroj: [www.geologie.vsb.cz](http://www.geologie.vsb.cz))

Přesnost zařízení závisí na preciznosti instalace a na kvalitě materiálu použitého pro přístroj. Udávaná hodnota přesnosti měření je 0,5 mm na pásce roztažené mezi 30 m vzdálené body (Klimeš et al., 2012). Princip pásmového extenzometru popisuje obrázek 3.

### 3.1.4 Deformometr

V případě této ověřené, dostupné a hojně používané metody, kterou je popsána ve zprávě Ministerstva dopravy ČR (2008) se nenechává na lokalitě žádné měřicí zařízení, do základny (dva skalní bloky oddělené puklinou) se pouze zasadí dvojice hrotů. Ty jsou z nekorodujícího materiálu a na povrch se buď přilepí, nebo se zatmelí do předem vyvrtaných otvorů.

Na takto připravené puklině je nutné v pravidelných intervalech provádět manuálně měření samotným deformometrem. K přenosnému rámu s jedním pevným a druhým pohyblivým ramenem se připevní číselníkový nebo digitální úchylkoměr. Když se rám roztáhne do vzdálenosti hrotů, je změna přenesena na úchylkoměr. Princip je jednoduchý a lehce pochopitelný z obrázku 4.



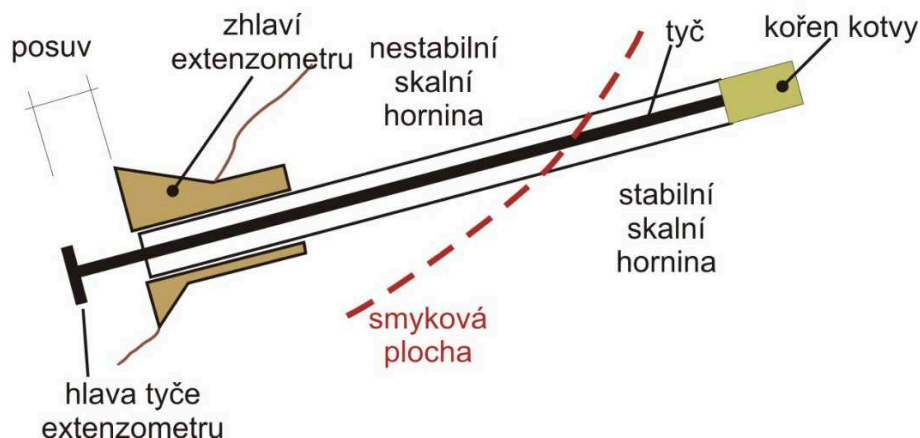
Obr: 4: Deformetr pro měření rozevírání trhlín, 1- posuvné měřidlo, 2 - úchylkoměr (Kořínek, Aldorf, 1994)

Součástí zařízení je základna na kalibraci, na které se před každým měřením opraví délka měřidla. Kalibrační základna je vyrobená většinou z invarového materiálu nebo z jiného materiálu, u kterého nehrozí výkyvy způsobené teplotní roztažností.

Vzdálenosti, které deformetr běžně překlene, se pohybují mezi 100 a 500 mm a Klimeš et al. (2012) uvádí citlivost deformometru 0,5 mm.

### 3.1.5 Tyčový extenzometr

Tento typ extenzometru se používá v rozvolněném horninovém masivu, ve kterém hrozí rozevírání aktuálních nebo vznik nových puklin, které časem mohou způsobit odtržení celých bloků. Zařízení představuje tyč ukotvenou jedním koncem na dně vrtu, druhý konec je připevněn k referenčnímu zhlaví na povrchu, viz obrázek 5. Na tom je prováděno samotné měření. Deformace se odečítá buď číselníkovým úchylkoměrem, nebo posuvným měřidlem. Extenzometry se vyrábějí z materiálů odolných proti korozi a mají nízkou tepelnou roztažnost, například ze sklolaminátů.



Obr. 5: Princip tyčového extenzometru (upraveno podle Rozsypal, 2001, zdroj: [www.geologie.vsb.cz](http://www.geologie.vsb.cz))

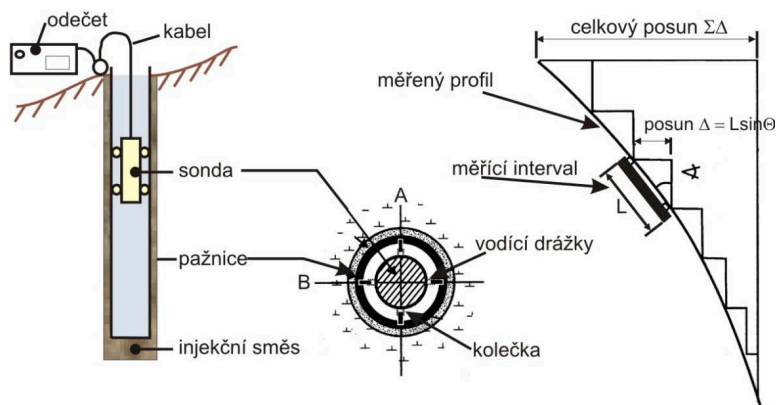
Přesnost měření extenzometru je 0,05 mm a hloubkový dosah obvykle nepřesahuje 50 m, jak uvádí Rozsypal (2001).

Vícenásobným extenzometrem lze přibližně určit i polohu smykové plochy. Do jednoho vrtu se v takovém případě umístí několik měřících tyčí, které sahají do různých hloubek, a porovnáním jednotlivých měření se detekuje nová puklina.

### 3.1.6 Inklinoměr

Metoda přesné inklinometrie se používá pro monitoring aktivity smykové plochy a k měření pohybu v hloubce. Princip metody spočívá v měření horizontálních posunů nebo odklonů od svislice. Jak popisuje Pargač (2013), probíhá měření ve vrtu hlubokém i desítky až stovky metrů, který je vystrojen dostatečně tuhou výpažnicí. Do něj jsou spouštěny inklinometrické sondy (viz Obr. 6). Každá je vybavena dvěma snímači, které zaznamenávají deformace ve dvou na sebe kolmých rovinách. V případě nekontinuálního monitoringu je sonda spuštěna na dno vrtu a v pravidelných krocích vytahována, přičemž se na každé etapě vrt provede záznam úklonu. Pro dosažení dostatečné přesnosti se měření tímto způsobem provádí alespoň třikrát.

Jiný postup platí v oblastech, kde je pro monitoring z bezpečnostních důvodů potřeba kontinuální záznam. V takovém případě je do vrtu umístěn řetězec inklinometrických sond vzdálených od sebe asi 50 cm. Měření probíhá v předem zvolených intervalech a hodnoty jsou rovnou odesílány ke zpracování (Lacerda, 2004). Tato metoda je pochopitelně ekonomicky náročnější.



Obr. 6: Princip měření inklinometrickou sondou (upraveno podle Rozsypal, 2001, zdroj: [www.geologie.vsb.cz](http://www.geologie.vsb.cz))

Podle Savvaidise (2003) je přesnost inklinometrů přibližně 0,02 mm. Chyby v měření mohou nastat při nedokonalém vyhotovení vrtu nebo při pokročilé deformaci, kdy už sonda není schopná vrtem projít.

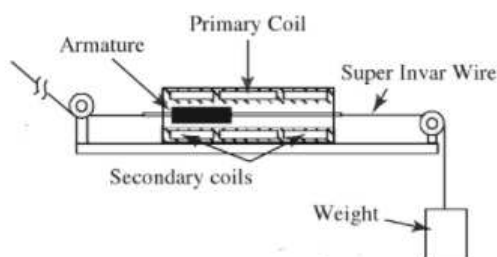
### 3.1.7 LVDT

LVDT (lineární variabilní diferenciální transformátor) snímač je založen na principu indukce. Jak vysvětluje Mohyla (2014), zařízení je vybaveno jednou primární cívkou a dvěma sekundárními cívkami umístěnými po obou stranách cívky primární. Do trubice, kterou cívky dohromady tvoří, je zasunuto pohyblivé feromagnetické jádro. Střídavý proud napájí primární cívku a indukuje napětí v sekundárních cívkách. Hodnota, kterou zaznamenáváme, je výstupní napětí, což je rozdíl napětí mezi sekundárními cívkami. Tato hodnota závisí na poloze feromagnetického jádra. Pokud je jádro ve středové pozici mezi sekundárními cívkami, napětí je na obou stejné. Při posunu jádra od středu se napětí na jedné sekundární cívkě sníží a na druhé zvýší. Výstupní napětí je proto přímo funkcí rozdílu napětí na sekundárních cívkách.

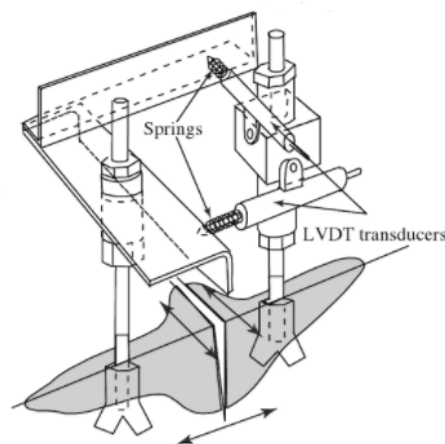
Princip měření je podobný jako u výše zmíněných extenzometrů, jak lze vidět na obrázcích 7 a 8, liší se ovšem způsob čtení posunu.

Přístroj tedy snímá pouze vzdálenost dvou bodů, ovšem s velmi vysokou citlivostí - 0,25 mm (Klimeš et al., 2012).





Obr. 7 konstrukce LVDT lankového extenzometru



Obr. 8 a aplikace LVDT na měření puklin (Greif V., 2004)

### 3.1.8 TM – 71 – Terčové měřidlo

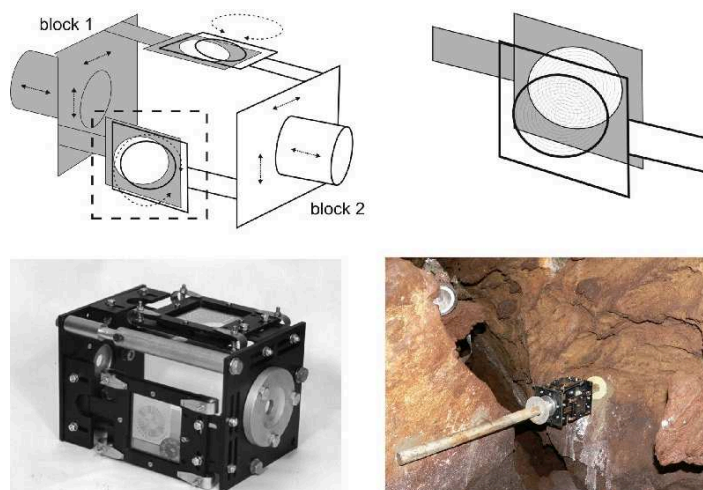
Přístroj byl sestaven v Geologickém ústavu ČSAV Košťákem (Záruba, 1974) a díky svým nesporným přednostem se hojně využívá k měření pohybů dodnes. Funguje na mechanicko-optickém principu a je pomocí něj možné sledovat pohyb ve třech směrech.

Instalace zařízení TM-71 je možné až po detailním zmapování oblasti, aplikace totiž podléhá jistým omezením. Pro použití je třeba znát velikost bloku, který monitorujeme a procesy zodpovědné za změny na puklině. Další zásadní informací je šířka pukliny – ramena přístroje mohou měřit až do rozpětí 2 m, pokud puklina tuto šířku překročí, je nutné je prodloužit buď delšími pažemi nebo/a betonovým upevněním, které zároveň zamezí deformaci zařízení vlivem vlastní váhy. Nejen pro správné měření ale i pro uchycení přístroje je nutné znát geometrii bloku. Navětrané nebo rozpukané bloky se k instalaci nehodí. Pokud je měření prováděno na rozpukaném bloku, musí být pažnice připevněna na obou stranách pukliny. Pokud není zařízení vybaveno automatickým zápisem naměřených dat (více níže), je důležitým aspektem také přístupnost zařízení pro obsluhujícího měřiče, který data bude chodit manuálně odečítat. Na druhou stranu by nemělo jít o lokalitu hojně navštěvovanou, tak by byl přístroj kromě vlivu prostředí vystaven ještě vlivu kolemjdoucích vandalů nebo zvědavců.

Protože je přístroj sestaven z ocele, dají se na mnoha lokalitách očekávat reakce materiálu na změny teploty. Pro zařízení přepažující puklinu o šířce 1 m se při poklesu teploty o 1 °C jedná o dilataci přístroje o 0,012 mm. Tento problém je korigován buď dodatečně během zpracování dat, nebo je mu předcházeno umístěním zařízení do hlubokých spár nebo jeskyní, kde je teplota během roku stabilní.

Prvotní data získaná přístrojem TM-71 nejsou jednotky změny délky ale jednotky moaré efektu, vertikální a horizontální. Nespornou výhodou tzv. košťákoměru je jeho schopnost zaznamenávat změny ve třech směrech, osa X popisuje dilataci pukliny, její otevírání a zavírání, osa Y je relativní horizontální střížná deformace a osa Z pohyb podél zlomu ve vertikální rovině. Kromě toho zařízení poskytuje rovněž informace o rotaci v horizontální (XY) a vertikální (XZ) rovině.

Jak bylo řečeno, měření může probíhat manuálně, tento způsob je ale nahrazován zautomatizovaným zápisem dat. V tomto případě ale musí být zajištěna ochrana proti vlhkosti. K automatickému zápisu je totiž potřeba na místě nechat dva digitální fotoaparáty, které snímají moaré efekt na překrývajících se sklíčkách, diodová světla, časovač a zařízení, na které jsou data zaznamenávána.



*Obr.9: Měřidlo TM-71 (nahore vlevo je schematický řez měřidlem, nahore vpravo je detail jednoho páru překrývajících se skl s jemnými spirálami. Dole vlevo je fotografie přístroje TM-71 a dole vpravo je přístroj nasazený na zlomové struktuře), ([www.tecnet.cz-USMH](http://www.tecnet.cz-USMH))*

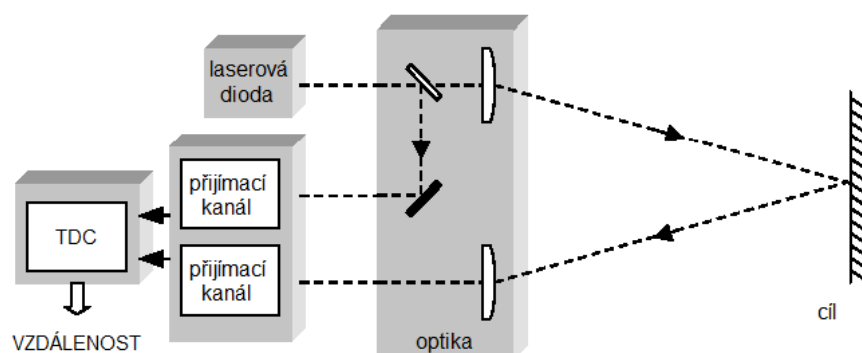
Výhody měření „košťákoměrem“ jsou velmi vysoká přesnost měření – v záznamech jsou vidět i výkyvy způsobené sezónními a klimatickými změnami. Citlivost zařízení je podle Klimeše et al. (2012) 0,01 – 0,03 mm. Dalším ne zcela běžným atributem jsou informace o změnách vzdálenosti ve třech směrech a záznam o rotačním pohybu. TM-71 je také určeno pro zanechání na místě měření po dlouhý časový úsek. To umožňuje sledovat vývoj oblasti ve smysluplně dlouhém období. Výhodou neautomatizovaného měření je jistota, že snímání nebude překaženo neočekávaným výpadkem proudu.

TM-71 ale má i jisté nevýhody. Manuální odečítání dat není možné v určitých obdobích, například v horských oblastech, kde je lokalita v zimě přikryta sněhem a tedy znepřístupněna. Tento nedostatek se dá pochopitelně řešit automatickým zápisem dat, to s sebou ale nese jistá rizika.

### 3.1.9 Laserový dálkoměr

Princip laserového dálkoměru je měření „času průchodu laserového paprsku“. Ze zařízení je vyslán namířený paprsek (optický pulz 2–20 ns) přes optický vysílač, který se odrazí od překážky-cíle a vrátí se k dálkoměru do optického přijímače. Tam světlo dopadne na plochu fotodetektoru a je převedeno na elektrický signál. Čas startu a čas příjmu pulzu je zaslán do TDC (časově digitální převodník – Time to Digital Converter), kde se časy odečítají a výsledek se převede na výslednou vzdálenost cílu od měřicího zařízení (Palojärvi, 2003).

Oproti mechanickým měřičům má laser tu výhodu, že je paprsek vždy přesně rovný a nemůže se např. provést jako lankové nebo páskové extenzometry. Svazek laseru je velmi úzký, je tak možné přesné zaměření sledovaného bodu. Citlivost přístroje je 0,3 mm (Klimeš et al., 2012).



Obr.10: Princip laserového dálkoměru (upraveno podle Palojärvi, 2003)

## 3.2 Dálkový průzkum Země a družicové metody

### 3.2.1 GNSS

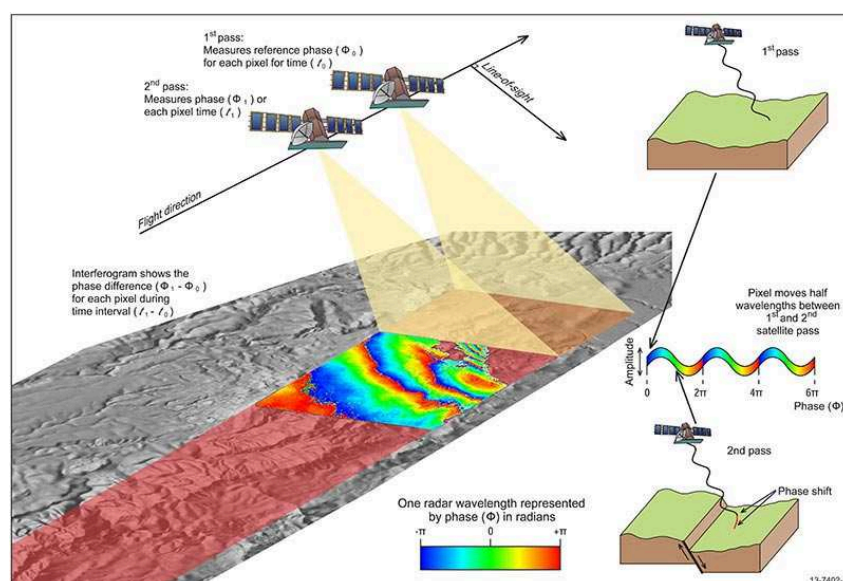
Globální družicový polohový systém je dnes využíván v mnoha oborech lidské činnosti. Pomocí něj je možné zaměřit s velmi vysokou přesností jakýkoliv vysílač na povrchu Země, tedy i vysílače umístěné na rizikových územích. Pokud jsou polohy vysílačů zaznamenávány pravidelně, lze sledovat jejich změny. Zaměřování je umožněno 32 družicemi obíhajícími zeměkouli.

Pro přesné zaměřování polohy (v milimetrech) je třeba zajistit velmi přesný záznam času. To ale může překazit například vliv ionosféry, kde se kvůli vysoké koncentraci volných elektronů a iontů radiové vlny lámou, a troposféry, kde dochází k podobnému problému a vlny přicházejí proto na povrch Země se zpožděním. Zpřesňování záznamu zajišťují komerční stanice, jejichž poloha je dobře známa a může být, proto srovnávána známá poloha s polohou vypočtenou GPS (Malet et al, 2002).

Oproti pozemním způsobům monitoringu má GPS tu nespornou výhodu, že je volba polohy bodů měření mnohem flexibilnější. Jednotlivé body mohou být v libovolné vzdálenosti – měří se pouze poloha jednoho bodu, ne změna vzdálenosti mezi dvěma a více body. GPS také pokryje mnohem větší plochu monitorování než běžné výzkumné metody. Měření probíhá za jakýchkoli podmínek, pravidelné docházení na lokalitu není potřeba (Gili et al, 2000). Dle Liu (2008) metoda GPS po všech korekcích poskytuje 3D-souřadnice s přesností 2-5 mm.

### 3.2.2 Radarová interferometrie – InSAR

V případě InSARu jsou z družice nebo z letadla vysílány k zemskému povrchu mikrovlnné pulzy a jsou zaznamenávány jejich odrazy. Data, která jsou následně zpracovávána, obsahují informace o fázi a amplitudě odraženého záření a fázi vysílaného záření. Měřené fáze jsou srovnávány a vzniká 3D model povrchu. Podstata monitoringu touto metodou spočívá v měření změn, ke kterým došlo mezi dvěma snímáními. Pokud deformace postoupila, projeví se to také v interferometrické fázi (Steiner, 2008). Názorná ilustraci měření je na obrázku 11.



Obr. 11 převzatý z webových stránek Geoscience Australia velmi názorně ilustruje, jak se při interferometrii dvou snímků vytvořených po sobě s jistým časovým intervalem, během kterého dojde k posunu, na interferogramu zřetelně zobrazí vzniklé deformace.

Schopnost radaru zachytit probíhající sesuv závisí na natočení svahu vzhledem k dráze prolétávajícího satelitu a na očekávané rychlosti sesuvu. Nejvyšší citlivost mají systémy SAR pro deformace ve směru

svého pohledu. Pohled satelitů obíhajících Zemi po polární dráze (dráze kolmé na rovinu rovníku) směřuje na východ a západ, deformace probíhající v severo-j jižním směru proto nezachytí.

Přesnost metody také závisí na počtu snímků, se kterými se pracuje. Důležitá je jejich kvalita, která se může snižovat v zalesněných oblastech nebo na velmi prudkých svazích. Při nízkých intervalech měření lze dosáhnout přesnosti metody v řádu milimetrů za rok.

Velkou výhodou oproti jiným metodám je možnost provádět měření i přes mlhu, oblaka a mírný déšť (Massonet, D., 1998).

### 3.2.3 EDM – Elektronický dálkoměr

Technologie elektronického dálkoměru užívá pozemní, vysoce přesný průzkumný přístroj umístěný na stabilním místě, který vysílá infračervené vlny a měří čas, za který vlna urazí vzdálenost od vysílače k odraznému hranolu nainstalovanému na sledovaném území a zpět. Měřením tedy nezískáváme souřadnice pozorovaného bodu, ale pouze vzdálenost bodu od bodu referenčního tak, jak to bylo u většiny metod geotechnických. Přesnost metody se pohybuje kolem 1 mm při měření kratších vzdáleností. Na vzdálenosti přesahující pár stovek metrů se začne projevovat chyba kvůli refrakci signálu vlivem atmosférických podmínek. Průchodem atmosférou totiž signál naráží například na prach nebo déšť, a tak dochází k absorpci a difuzi, kdy je část energie vlnění pohlcována a rozptýlována. Výroba velmi přesně měřících elektronických dálkoměrů se ale výrazně snižuje, poptávka po přístroji klesá a cena takových zařízení je velmi vysoká (Savvaidis, 2003).

Elektronický dálkoměr se používá také jako nedílná součást totálních stanic. Totální stanice jsou zařízeními kombinujícími EDM a elektronický teodolit, kterými zaznamenává horizontální i vertikální změny vzdálenosti. Navíc mají integrovaný mikroprocesor, a dokáží sbírat a ukládat naměřená data. Hodnoty jsou totální stanicí dokonce rovnou analyzovány a opravovány na teplotu a tlak, takže potom může zařízení posílat rovnou souřadnice sledovaných bodů nebo vzdálenost mezi dvěma sledovanými body (Clague, 2012). Některé totální stanice jsou spojovány i s GPS pro určení polohy přístroje v terénu.

Kontinuální měření vzdálenosti je omezeno podmínkami, které v oblasti panují. Pokud tedy hrozí, že odrazný hranol zapadá sněhem, není pro monitoring zrovna elektronický dálkoměr tou pravou volbou.

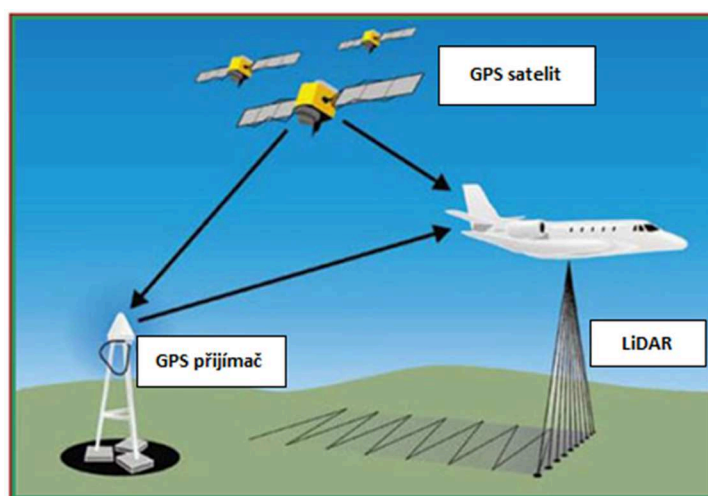
### 3.2.4 LiDAR

LiDAR (Light Detection and Ranging) funguje na stejném principu jako laserový dálkoměr, tedy na měření doby letu laserového paprsku, má ale mnohem komplexnější využití. Zevrubný popis dnešní aplikace LiDARu na monitoring svahových deformací poskytuje Jaboyedoff (2010).

## ALS – Letecké laserové skenování

Letecké laserové skenování je využíváno primárně pro monitoring sesuvů k tvorbě precizních digitálních modelů povrchu (HRDEM – highresolution digital elevation models).

Laserový scanner je připevněn k letadlu (obrázek 11) a tvoří 3D model z mračka naměřených bodů povrchu Země. Momentálně je to nejpřesnější metoda k získání digitálního modelu elevace a nahrazuje dříve hojněji používanou fotogrammetrii. Její hlavní výhodou je schopnost odfiltrování vegetace z bodového mračka a získání pravého povrchu Země.



Obr. 11.: Princip měření metodou LiDAR (upraveno podle Holden et al. 2002)

Zařízení se skládá z vysílače a přijímače laserového paprsku. Pro sledování sesuvů se většinou používá způsob zaznamenávání laserového pulzu, přesněji doby, za kterou paprsek dorazí k Zemi, odrazí se od povrchu, vegetace nebo zástavby a vrátí se zpátky. Při známé poloze letadla a přesně zaměřeném paprsku potom lze z času letu určit i souřadnice bodu, od kterého se paprsek odrazil.

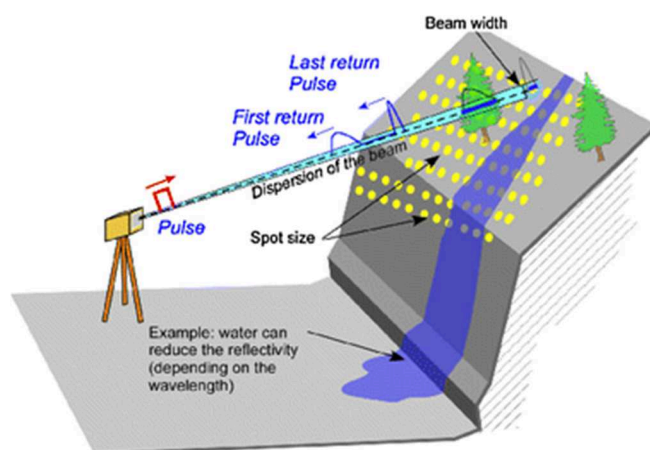
Při skenování pro získání reálného modelu reliéfu je třeba odfiltrovat rušivé elementy, které se na povrchu Země nacházejí. Snímač proto nezaznamenává pouze dobu příchodu signálu zpět k letadlu, ale i tvar vlny – ten obsahuje informace o materiálu, od kterého se paprsek odrazil. Problém nastává, pokud je porost příliš hustý a ALS model se stává podobně přesným jako běžný model získaný z topografických map.

Hlavní výhody laserového skenování je získání kvalitních 3D informací ve velmi krátké době. Tak to uvádí Ardizzone et al. (2007) ve studii mapování sesuvů v centrální Umbrii v Itálii.

## TSL – Pozemní laserové skenování

Největší výhodou pozemního skenování je rychlý sběr dat, přesnost a komplexnost měření. Přístroj k vysílání paprsku používá pulzní laserovou technologii a signál potom rozmítá rotujícím zrcadlem. Spojením dvou zrcadel lze paprsek vychylovat do dvou směrů. LiDAR dnes již v některých případech nahrazuje EDM v totálních stanicích. Jinak je pouze o zařízení připevněné na stativu zaznamenávající data, která ale musí být zpracována později. Pro vhodné umístění pozemního skeneru je třeba po rekognoscaci terénu zvážit účel měření a možnosti přístroje (zorné pole, hustota skenování) a tvar a povrch skenovaného prostředí (zákryty, pohltivost signálu). Do terénu se někdy také umísťují vlíčovací body, které mají známou polohu a pomáhají potom zorientovat se v naměřeném mračku bodů.

Pro odfiltrování porostu metoda TLS využívá způsob měření, při kterém nezaznamenává pouze první navrátilší se puls, ale všechny odražené pulzy z jednoho vyslaného. Tak se model zbaví stromů, vedení nebo ptáků, na které paprsek narazil (Caudal, P., 2017).



Obr. 12: Princip pozemního laserového skenování, převzato z Jaboyedoff (2012)

Ačkoli pozemní skenování nemusí tak zásadní význam pro jednorázové skenování sesuvů, může být velmi užitečné k interpretaci mechanismu sesuvu, vykreslení hranic a stanovení objemu. Na druhou stranu je TLS mnohem přesnější než letecká verze skenování (2,5 - 30 cm vs. <1 m), pro monitoring je tedy vhodnější ona. Jak říká Manetti (2007 in Jaboyedoff (2010)), je ale přesto citlivost metody poměrně nízká a velmi časté opakování měření nepřinese zvláštní výsledky.

Baldo et al. (2009) ve své zprávě o měření na sesuvu Rdicofani vyzdvihují přednosti TSL v možnosti měření objemu masy sesuvu, zaměření hranic různých částí sesuvu a ve velmi přesné informaci o dynamice probíhajícího sesuvu. Zmiňuje také nutnost dobré spolupráce týmu řídicího a zpracovávajícího měření.

### 3.3 Pozemní geodetické metody

Pozemní geodetické metody jsou velmi běžné pro získávání hodnot absolutní změny polohy. Některé z nich vyžadují opakovanou přítomnost měřičů na lokalitě, jiné mohou být zanechány v terénu, kde kontrolovány počítačem měří v pravidelných intervalech.

#### 3.3.1 Nivelace

Nivelace je klasická metoda používaná k měření vertikálních změn terénu. Žádná jiná metoda kromě nivelace a GPS není tak citlivá na tyto změny, podle Ogundare (2015) lze s dnešními přístroji zaznamenat deformaci menší než milimetr.

Pro měření v zájmu monitoringu se většinou postupuje způsobem geometrická nivelace ze středu. Je k němu třeba nivelační přístroj – dalekohled upevněný na stativu, který se pomocí kompenzátoru vyrovná tak, aby byla osa jeho otáčení svislá. Přístrojem jsou zaměřovány nivelační latě opatřené stupnicí tak, že dalekohled umístěný zhruba do středu mezi dvě latě odečte výškové hodnoty na obou latích. Rozdíl naměřených hodnot je potom převýšení bodů, na kterých jsou latě umístěny. Pro absolutní výškovou hodnotu bodů je potřeba trasovat terén od bodu se známou výškou (Pacina, J., Brejcha, 2014).

Sběr dat pochopitelně nemůže být dálkový, provádí ho tým měřičů – jedna osoba obsluhuje nivelační přístroj, další dvě drží latě a další zaznamenává naměřené hodnoty a atmosférické podmínky. U práce méně zkušených měřičů zmiňuje Staněk (2014) chyby v měření, které většinou vznikají chybným čtením, nedodržením technologie měření nebo měřením v nevhodném počasí. Když se jich měřiči vyvarují, lze dosáhnout přesnosti dat 2–5 mm/km.

#### 3.3.2 Přesná nivelace

Tato metoda funguje na stejném principu jako nivelace obyčejná, díky preciznějšímu postupu prací ale poskytuje ještě přesnější hodnoty. Provedení prací probíhá za použití nivelačního přístroje s minimálně 24násobným zvětšením, který se musí chránit slunečníkem, latě musí být vyrobeny z celistvého kusu a vybaveny kvalitní urovnávací libelou, nivelují se záměry dlouhé maximálně 50 m, a to vždy dvakrát v jinou denní dobu.

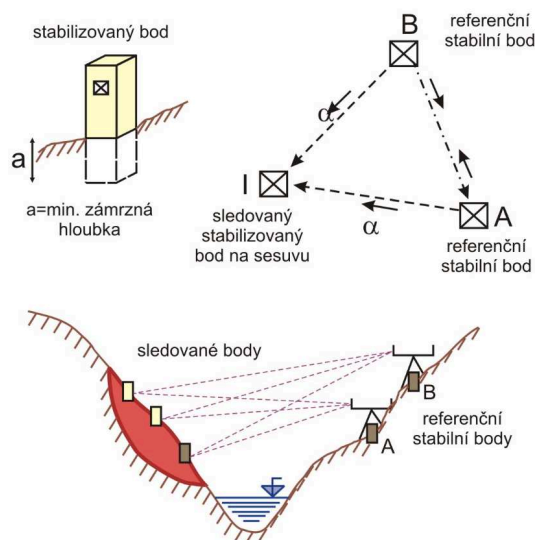
Přesnost měření pomocí přesné nivelace je zlomek milimetru i pro body vzdálené kilometr od původního bodu (Galloway, 1999 in Colesanti, 2002).

#### 3.3.3 Triangulace

Při monitorování bodu trigometrickým měřením se neměří vzdálenost od známého stabilního bodu, ale úhly, které svírá spojnice dvou známých bodů s pozorovaným bodem. Vzdálenost oněch dvou stabilních referenčních bodů musí být velmi přesně změřená, aby bylo možné pak z naměřených úhlů



spočítat vzdálenost a tím i polohu sledovaného bodu s přesností 5–10 mm. Úhly, které spolu strany trojúhelníku svírají, se měří pomocí teodolitu upevněného na sloupku nebo při zaměřování na delší vzdálenosti na nízké věžové konstrukci (Torge, 2012). Princip trigonometrického měření je na obr. 13.



Obr. 13: Určování polohových změn stabilizovaných bodů trigonometrickým měřením (upraveno podle Rozsypal, 2001, zdroj: [www.geologie.vsb.cz](http://www.geologie.vsb.cz))

Při průzkumu větší plochy se celé území postupně rozdělí do trojúhelníků, jejichž strany potom samy tvoří základní linie, od kterých se zaměřují další body. Tím pochopitelně dochází k chybám, které se sčítají s každou novou nepřesností. Proto je záhodno některé z linií ověřit ještě zvláštním měřením, než je dále použijeme jako výchozí (Dugal, 2013).

### 3.3.4 Polygonový pořad

Tato metoda umožňuje současné určení souřadnic několika různých bodů najednou. Začátek i konec pořadu se nachází v bodech se známými souřadnicemi. Pořad je lomená čára tvořící liniovou síť bodů. Ze základního bodu se známými souřadnicemi měřič vybere sadu bodů, každý další bod musí být nadohled toho předchozího. Volba linie se řídí potřebami měření, může to tedy být například okraj strukturní diskontinuity (Dugal, 2013).

Pořad může být buď otevřený, první a poslední bod není identický, nebo uzavřený, kdy se série vrací zpátky k výchozímu bodu. U otevřených se potom na každém bodě měří úhel, o který linie změnila směr. V uzavřeném pořadu jsou to vnitřní úhly polygonu, který pořad tvoří. Dále se měří vzdálenost mezi po sobě jdoucími body, to se provádí buď páskou nebo elektronickými distančními přístroji (EDM) (Cole, 2015).



získají evidentní spojitosti a mohou být analyzovány. Navíc je použití praktické v oblastech, kde by se měření mohla křížit s výstavbovou činností. Gili (2000) uvádí citlivost metody 10 cm.

#### 3.4.2 Pozemní fotogrammetrie

Má jiné ale neméně význačné výhody. Pro svou vyšší přesnost může být používána na regulérní lokální dlouhodobé průzkumy deformací. Praktická je v oblastech velmi příkrých svahů nebo jednoduše příliš malého rozsahu, než aby ho letecká fotogrammetrie mohla zachytit. Lze s ní také prošetřovat území, na které je nebezpečné vstupovat. Z důvodu přesného zaměření je přístroj vybaven teodolitem a říká se mu proto fototeodolit. Přesnost určování polohy pomocí pozemní fotogrammetrie speciálními fotografickými komorami závisí hlavně na přesnosti zaměření souřadnic snímku a měřítko fotografie, citlivost dosahuje 20 mm/100 m. Kontinuální měření se záznamy v reálném čase se stává proveditelným s novými technologiemi CCD snímačů zabudovaných do přístroje, které tak mají mnohem lepší světelnou citlivost. To se projeví v lepší kvalitě obrazu při špatném osvětlení.

## 4 Shrnutí metod

Tabulka 1 shrnuje popis dvaceti studovaných metod měření pomalých pohybů na diskontinuitách. V tabulce je uvedeno ke každé z metod její výstupní data, tedy informace, které jsou výsledkem měření (kde  $\Delta$  vzdálenost vyjadřuje měření mezi dvěma body,  $\Delta x$   $\Delta y$   $\Delta z$  vyjadřuje měření v ose  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Citlivost uvedená v tabulce nezahrnuje chyby měření způsobené vnějšími vlivy. Příklady aplikací popisují primární oblast využití jednotlivých metod.

METODA	VÝSTUPNÍ DATA	CITLIVOST	PŘÍKLADY APLIKACE
Lankový extenzometr	$\Delta$ vzdálenost	0,1 mm	Měření rozevírající se trhliny
Vrtný extenzometr	$\Delta$ vzdálenost	0,03 mm	Měření vertikální změny ve vrtu
Pásmový extenzometr	$\Delta$ vzdálenost	0,5 mm/30 m	Měření rozevírající se trhliny
Deformometr	$\Delta$ vzdálenost	0,5 mm	Měření rozevírající se trhliny
Tyčový extenzometr	$\Delta$ vzdálenost	0,05 mm	Přibližné určení smykové plochy sesuvů
Inklinoměr	$\Delta$ úhel odklonu od svislice, resp. $\Delta x$ $\Delta y$	0,01–0,1°, resp. 0,02 mm	Měření horizontální deformace ve vrtu vyvolané pohybem po smykové ploše
LVDT	$\Delta$ vzdálenost	0,25 mm	Měření rozevírající se trhliny
TM – 71	$\Delta x$ $\Delta y$ $\Delta z$ $\Delta$ úhel	0,01–0,03 mm	Měření velmi pomalu se rozevírající trhliny
Laserový dálkoměr	$\Delta$ vzdálenost	0,3 mm	Měření posuvů na povrchu hornin a objektů
GNSS	$\Delta x$ $\Delta y$ $\Delta z$	2–5 mm	Sledování měřících bodů v tele sesuvů
InSAR	$\Delta x$ $\Delta y$ $\Delta z$	10 mm	Sledování svahových deformací velkých rozměrů
EDM	$\Delta$ vzdálenost	1–5 mm	Měření posuvů na povrchu hornin a objektů
LiDAR	$\Delta x$ $\Delta y$ $\Delta z$	2,5 – 30 cm pozemní <1 m letecký	Sledování svahových deformací velkých rozměrů
Nivelace	$\Delta z$	2–5 mm/1 km	Měření vertikálních posuvů na povrchu terénu a objektů např. v oblasti poklesové deprese tunelu
Přesná nivelace	$\Delta z$	0,2 – 1 mm/1 km	Měření vertikálních posuvů na povrchu terénu a objektů např. v oblasti poklesové deprese tunelu
Triangulace	$\Delta x$ $\Delta y$ $\Delta z$	5–10 mm	Měření posuvů na povrchu můžeme-li měřit z 2 a více stabilních bodů mimo sesuv.
Polygonový pořad	$\Delta x$ $\Delta y$ $\Delta z$	5–10 mm	Měření posuvů na povrchu v zarostlých terénech
Záměrná přímka	$\Delta h$ $\Delta v$	0,5 – 3 mm	Hrubý odhad rychlosti a velikosti pohybu sesuvu
Letecká fotogrametrie	$\Delta x$ $\Delta y$ $\Delta z$	10 cm	Hrubý odhad velikosti posunů sesuvů
Pozemní fotogrametrie	$\Delta x$ $\Delta y$ $\Delta z$	20 mm/100 m	Sledování posuvů v terénu bez vegetace

Tab. 1: Shrnutí metod měření pomalých pohybů (upraveno a rozšířeno podle Gilli et al., 2000 v Klimeš et al., 2012)

## 5 Závěr a diskuse

V rámci své bakalářské práce jsem se snažila shrnout důvody pro důležitost měření velmi pomalých posunů horninových celků na diskontinuitách a popsat typy geologických prostředí, ve kterých k takovým pohybům může docházet. Těžištěm mé práce potom byla charakteristika metod monitoringu deformací. Jejich citlivost musí být velice vysoká, předmětem zájmu jsou totiž pohyby o rychlostech v řádu milimetrů za rok. Způsoby měření se od sebe velmi liší, a to jak v principu metody, tak ve vhodnosti použití dané metody pro určitý typ lokality. Výběr metody musí být pečlivě zvážěn podle možností a omezení zařízení, vlastností inkriminované diskontinuity a výsledků, která pro výzkum potřebujeme/chceme získat. Jako nejcitlivější způsob měření se ukázalo být zařízení TM-71, které ze studovaných metod zároveň nabízí i nejširší spektrum výstupních dat. Je ale použitelný zejména pro měření na velmi pomalu se rozevírající puklině. Naopak pro monitoring, ve kterém je potřeba obsáhnout větší plochy, se ukazuje jako nejvhodnější metoda GNSS. Vzhledem k rychle se rozvíjejícím technologiím lze ale očekávat, že přesnosti GNSS brzy dosáhne i LiDAR, který navíc nabízí i přesný digitální elevační model. Dalším kritériem jsou samozřejmě finanční možnosti daného projektu, náklady se zrovna v tomto případě velmi různí. Pro detekci smykových ploch sesuvu se ukázala být nejvhodnější a nejpresnější metodou inklinoměr.

Při psaní práce jsem narazila na problém absence obecných popisů přístrojů ve vědeckých článcích. Ty pochopitelně většinou hovoří o jednotlivých lokalitách a jejich specifických aspektech, zmíní metodu zvolenou pro monitoring a rovnou se přesunou k analýze naměřených dat. Samotné technologie měření se dotýkají málokdy. Abych se vyhnula čerpání informací z manuálů firem vyrábějících zařízení, bylo nutné z článků vybírat kusé informace, které byly zmíněny mimochodem. Z toho ovšem plynul problém neshod mezi jednotlivými články. Například v údajích o citlivosti přístrojů se zdroje rozcházely velmi výrazně. Podrobnější zaměření na jednu nebo více měřících metod a detailnější studium jejich možností a využití by mohlo být v budoucnu tématem mé diplomové práce.

## 6 Použitá literatura

Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P.: *Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar*, Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2007

Baldo, M., Bicocchi, C., Chiocchini, U., Giordan, D., Lollino, G.: *LIDAR monitoring of mass wasting processes: The Radicofani landslide, Province of Siena, Central Italy*, Geomorfology, Volume 105, Issues 3-4, 2009

Caudal, P., Grenon, M.: *Analysis of a large rock slope failure on the east wall of the LAB Chrysotile Mine in Canada: LiDAR Monitoring and Displacement Analyses*, Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 50, Issue 4, April 2017

Clague, J. J., Douglas, S.: *Landslides – Types, Mechanisms and Modeling*, Cambridge University Press, ISBN 9781107002067, 2012

Cole, G. M.: *Surveyor Reference Manual*, 6e, ISBN 978-1-59126-490-3, 2015

Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F.: *Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Techniques*, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, 2002

Corominas, J., Moya, J., Lloret, A., Gili, J.A., Angeli, M.G., Pasuto, A., Silvano, S.: *Measurement of landslide displacements using a wire extensometer*, Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Technical University of Catalonia, 2000

Dugal, S. K.: *Surveying Vol II*, 4e, ISBN 9332901031, Tata McGraw-Hill Education, 2013

Geoscience Australia, Australian Government: *Interferometric Synthetic Aperture Radar*, <http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/geodetic-techniques/interferometric-synthetic-aperture-radar>, 18. srpen 2017

Gili, J. A., Corominas, J., Rius, J.: *Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring*, Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Technical University of Catalonia, 2000

Gorgula, S.: *A comparison of three survey methods: baseline offset, trilateration and triangulation*, Maritime Archaeology Field School, 2002

Greif, V., Sassa, K., Fukuoka, H.: *Monitoring of rock displacements at Bitchu-Matsuyama Rock slope in Japan using Linear Variable Differential Transformer (LVDT) Sensors*, 2004

- Guerrierro, L., Guerriero, G., Grelle, G., Guadagno, F. M., Revellino, P.: *Brief Communication: A low-cost Arduino-based wire extensometer for earth flow monitoring*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 17, 881-885, 2017
- Jaboyedoff, M., Oppikofer T., Abellán, A., Derron M. - H., Loye, A., Metzger, R., Pedrazzini A.: *Use of LIDAR investigations: a review*, Natural Hazards, March 2012, Volume 61, Issue 1, 2012
- Klimeš, J., Rowberry, M. D., Blahůt, J., Briestenský, M., Hartvich, F., Košťák, B., Rybář, J., Stemberk, J., Štěpančíková, P.: *The monitoring of slow-moving landslides and assessment of stabilisation measures using an optival-mechanical crack gauge*, Landslides, Volume 9, Issue 3, 2012
- Kořínek, R., Aldorf, J., *Geotechnický monitoring: Určeno pro posl. Fak. hornicko-geologická, Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava*, 1994
- Lacerda, W., Ehrlich M., Fontoura S. A. B., Sayao A. S. F.: *Landslides - Evaluation and Stabilization/Glisement de Terrain: Evaluation et Stabilisation*, Set of 2 Volumes: Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, Brazil, June 28 -July 2, 2004
- Liu, S., Wang, Z.: *Choice of surveying methods for landslides monitoring*, Landslides and Engineered Slopes – Chen at al., Taylor and Francis Group, ISBN 978-0-415-41196-7, 2008
- Malet, J.-P., Maquaire, O., Calais, E., *The use of Global Positioning System techniques for the continious monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France)*, Geomorfology 43, 2002
- Massonet, D., Feigl, K.L.: *Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface*, Reviews of Geophysics 36, November 1998
- Mentes, Gy.: *Borehole Wire Extensometer for Measurement of Small Displacements*, Geodetic and Geophysical Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 2011
- Ministerstvo dopravy ČR: *Měření a dlouhodobé sledování trhlin v betonových konstrukcích*, ČVUT v Praze Kloknerův ústav, 2008
- Mohyla, T.: *Přetvárné parametry brněnského téglu z malých deformací v trojosém přístroji*, Univerzita Karlova, Ústav aplikované geologie, 2014
- Moreno, T., Wallis, S. R., Kojima, T., Gibbons, W., *The Geology of Japan*, Geological Society of London, ISBN 978-1-86239-706-4, 2016
- Němčok, A., Pašek, J., Rybář, J.: *Dělení svahových pohybů*, Sborník Geol. věd., č. 11, Praha, 1974

Ogundare, J. O.: *Precision Surveying: The principles and Geomatics Practice*, ISBN 978-1-119-10251-9, 2015

Ondrášik, R., Rybář, J.: *Dynamická inžinierska geológia*, SPN, Bratislava, 267 s, ISBN 80-08-00366-9, 1991

Pacina, J., Brejcha, M.: *Digitální modely terénu*, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Ústí nad Labem, 2014

Palojärvi, P.: *Integrated electronic and optoelectronic circuits and devices for pulsed time-of-flight laser ranging*, University of Oulu, Oulu University Press, ISBN 951-42-6966-7, 2003

Pargač, M.: *Zajištění hlubokého zářezu v sesuvné oblasti*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky, 2013

Rozsypal, A.: *Kontrolní sledování a rizika v geotechnice*, Jaga group, v.o.s., Bratislava, ISBN 80-88905-44-3, 2001

Savvaidis P. D.: *Existing Landslide Monitoring Systems and Techniques*, Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, The Aristotle University of Thessaloniki, 2003

Staněk, A.: *Měření přesné opakované nivelace na polygonu Tetčice*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie, 2014

Steiner, P.: *Odhad vlivu topografie na atmosférické zpožnění radarových signálů metodou radarové interferometrie*, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Obor geodézie a kartografie, 2008

Štainerová L.: *Návrh zajištění hlubokého zářezu*, VUT v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky, 2015

Torge, W., Müller J.: *Geodesy*, University of Hannover, 4e, ISBN 3110250004, 2012

Záruba, O., Mencl, V.: *Sesuvy a zabezpečování svahů* – NČAV. Praha, 1987

WEB:

[www.geologie.vsb.cz](http://www.geologie.vsb.cz)

[www.tecnet.cz-USMH](http://www.tecnet.cz-USMH)